

地质与测量

煤储层开发动态地质评价理论与技术进展

秦 勇¹, 汤达祯², 刘大锰², 张遂安³, 韦重韬¹, 王生维⁴, 傅雪海¹, 唐书恒², 姜 波¹, 许 江⁵, 秦其明⁶

(1. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221116; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 中国石油大学(北京), 北京 102249;
4. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 5. 重庆大学, 重庆 400044; 6. 北京大学, 北京 100871)

摘要:项目组以沁水盆地、鄂尔多斯盆地等为研究对象,取得了煤层气高产井区地质控制模式、煤储层物性动态规律与数学模型、多层叠置含煤层气系统、煤层气开发解吸阶段数值描述等4项理论认识;形成了煤层水及孔隙低场核磁共振表征、煤层气有利建产区地质综合评价、多层叠置含气系统煤层气递进排采地质设计、煤储层开发地质动态评价等4项评价技术;研发了多煤层多场耦合煤层气开采物理模拟试验系统、煤层气直井流体参数探测仪、煤层含气量天然源超低频电磁探测仪等3套装备,初步形成了适合于研究区地质条件的煤层气开发地质保障技术体系框架,为满足煤层气大规模开发需求提供了参考。

关键词:煤层气;煤储层;地质保障技术;地质评价

中图分类号:TD712.67 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2014)01-0080-09

Geological Evaluation Theory and Technology Progress of Coal Reservoir Dynamics During Coalbed Methane Drainage

QIN Yong¹, TANG Da-zhen², LIU Da-meng², ZHANG Sui-an³, WEI Chong-tao¹, WANG Sheng-wei⁴,
FU Xue-hai¹, TANG Shu-heng², JIANG Bo¹, XU Jiang⁵, QIN Qi-ming⁶

(1. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
3. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;
5. Chongqing University, Chongqing 400044, China; 6. Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract:Taking Qinshui and Ordos basins as the research objects, four theoretical knowledges were suggested such as the geological control modes of CBM high-production wellblock, the dynamic and mathematical model of coal reservoir properties, the multiple superposed CBM systems (MS-CBMS) and the numerical description of CBM drainage and desorption phases. Four evaluation technologies were developed including the nuclear magnetic resonance characterization of coalbed water and pore, the comprehensive geological evaluation of favorable CBM production-building region, the geological design of progressive CBM drainage for the MS-CBMS, and the geological evaluation of coal reservoir development dynamic. Three sets of the equipments were developed for the physical simulation of the CBM drainage under the multiple coalbeds and fields, the detection of the fluid parameters in vertical CBM wells and the detection of the CBM content with natural ultra-low frequency electromagnetic wave. A geological service technology system framework of the CBM drainage suitable to the geological conditions of the basins had been initially set up, so as to provide a basis for meeting the national demands of large-scale CBM development.

Key words:coalbed methane; coal reservoir; geological service technology; geological evaluation

收稿日期:2013-09-17;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.est.2014.01.020

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX05034);国家自然科学基金重点资助项目(U13612031);山西省煤层气联合基金重点资助项目(2012012001)

作者简介:秦 勇(1957—),男,重庆人,教授,博士,现任中国矿业大学副校长。E-mail:yongqin@cumt.edu.cn

引用格式:秦 勇,汤达祯,刘大锰,等.煤储层开发动态地质评价理论与技术进展[J].煤炭科学技术,2014,42(1):80-88.

QIN Yong, TANG Da-zhen, LIU Da-meng, et al. Geological Evaluation Theory and Technology Progress of Coal Reservoir Dynamics During Coalbed Methane Drainage [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 80-88.

0 引 言

煤层气开采过程中,地下流体(煤层气和地下水)不断排出,煤层含气性和孔隙流体压力不断变化,诱导煤体和渗透率发生动态应变,进而影响到煤层气井和煤层气田的生产特性和产气能力。煤层气开发地质保障工作贯穿于勘探与开发的整个过程,其核心是及时分析与预测煤储层在煤层气开发过程中的动态变化,并诊断导致变化的地质原因,进而为实施煤层气稳产增产措施提供依据。我国自2003年开始煤层气地面井商业性生产,前期限于产业发展阶段及资料积累,注重勘探技术和钻井、完井、排采管理等开发技术的研究,以煤储层动态变化及其评价监控为核心的开发地质保障技术的研发却相对滞后,难以满足煤层气大规模地面开发的需求。为此,笔者自2008年以来承担国家科技重大专项项目,针对煤储层开动态进行地质研究,以期逐步建立适合于我国不同地质条件的煤层气开发地质保障技术体系,为实现煤层气开发技术的重大创新提供关键基础^[1],本文报道了该项目的阶段性研发进展。

1 煤储层开动态地质评价研究思路

煤储层开动态地质评价主要针对含气性、渗透性和储层压力3个基本要素,它们在煤层气开采过程中的动态变化特征受诸多地质条件影响^[2]。我国地质条件复杂,要建立开发地质保障技术体系,以满足中国煤层气地面规模性开发的需求,面临2类技术难题。

1)上古生界是我国煤层气近期开发的主要目标层系,煤田构造类型多种多样,地质演化历史复杂,煤储层构造改造相对强烈,导致煤储层普遍具有低孔、低渗、低压和高非均质性的特点。由此,直接搬用国外煤层气开发地质保障技术难以表征和评价我国上古生界煤储层特征,更难以用来预测我国煤储层特性在排采作用诱导下的变化规律和实现煤储层开动态地质评价。

2)国外高阶煤层气商业性开发区块较少,我国近期煤层气产业化基地有沁水盆地中~高阶煤区以及鄂尔多斯盆地东缘低阶~高阶区,在沁水盆地南部高阶煤地区率先取得煤层气规模化开发的突破,但迄今存在直井的单井平均产量变化极大、中~后

期产量动态不明等问题。要解决这些问题没有国外成熟且适用的煤储层动态特征评价与监测技术可供借鉴。

上述2类难题可进一步细化为5个方面的技术难点:①如何发挥煤储层精细描述对储层工程的指导作用,形成区块尺度内有利建产区地质评价技术;②如何深化煤基质及气水相渗动态变化规律研究,并将其转化为指导煤层气排采管理过程的实用技术;③如何阐明煤层气田产气能力影响因素,并将有关模型转化为煤储层产能地质适时调控技术;④前人总结了影响煤层气单井和多井产量的因素,但不同勘探开发区地质差异及不同储层改造措施对煤层气产能效果有何影响,煤层气工程界知之甚少;⑤如何研发煤层气田开动态地质评价体系及软件,为煤层气生产地质保障提供实用手段^[1]。

鉴于上述难点,项目组在“十一五”研究成果基础上,“十二五”期间重点突破区块范围内的煤储层特性精细描述、煤层含气量与渗透性动态探测、高产水/弱含水煤储层特性排采动态预测、多煤层条件下煤层气联合开采储层动态评价、煤储层开动态地质评价系统及软件等5个关键技术难点,以期定量综合表征同一区块内煤储层的强烈非均质性及其对煤层气井产能的影响,分析煤储层三要素的排采诱导变化耦合特征及其对产能的控制效应,发展煤储层特性排采动态地面或钻孔监控装备,研发特殊地质条件(如高产水、弱产水、多煤层等)下煤储层排采动态的针对性分析技术,通过研发软件系统来集成上述问题的解决方案并形成综合评价技术(图1)^[1]。

2 关于煤储层开发地质动态4项理论认识

2.1 煤层气高产井区地质控制模式

以沁水盆地南部樊庄、郑庄区块以及鄂尔多斯东缘韩城、柳林、临汾区块等示范区为剖析对象,揭示了区块尺度煤层气富集和高产的主控地质因素,为实现区块尺度内有利建产区的精细评价与预测提供了可行基础^[3]。

在新的深度上认识了不同地质条件典型区块煤层气富集高渗的主控地质因素^[4~12]。研究表明,区块尺度内影响煤层气富集高渗的关键地质因素是构造形态、水文地质条件、煤层顶底板岩性和水平应力状态,但在不同区块的表现形式有所不同。在郑

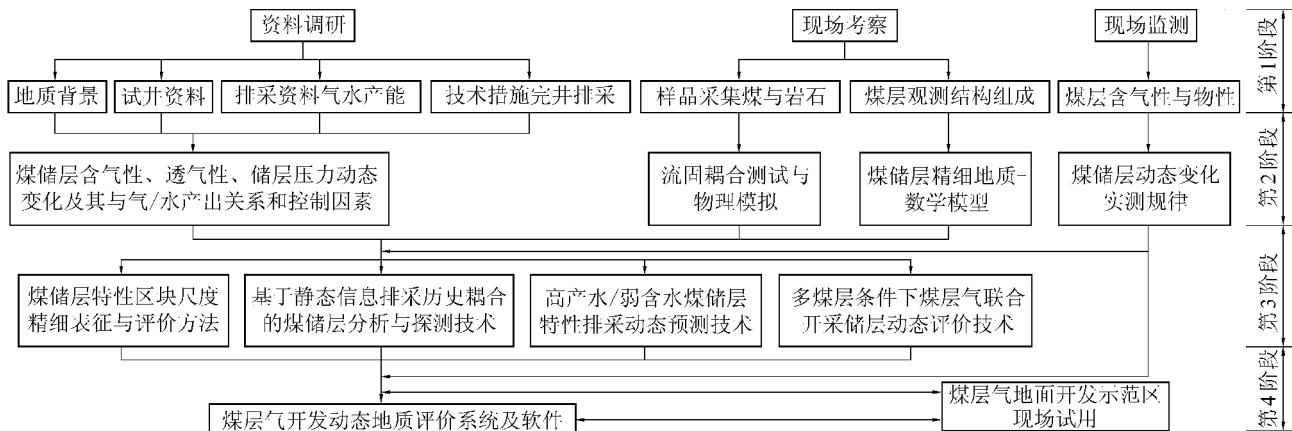


图1 煤储层开发动态地质评价研究内容与技术流程

庄高阶煤区块次级褶曲核部,当泥质岩类顶板厚度小于9 m时煤层含气量随顶板厚度的减小而明显降低,厚度大于9 m时则构造对煤层含气量几乎没有影响;构造应力场水平主应力差控制着煤层原始渗透率的分异,应力差大于15 MPa的区域煤层试井渗透率普遍较高。在渭北中~高阶煤区块,水文地质条件控气表现为3种形式:热成因-运移-断层封堵型煤层含气量高于15 m³/t,水力封闭型煤层含气量在12~15 m³/t,水力冲刷逸散型仅在局部构造圈闭中可达4~8 m³/t。临汾中阶煤区块低应力带总体上呈NE—SW向展布,大致与鸣啼背斜轴吻合,有利于深部煤层气向浅部背斜轴部运移产出。

文献[3]基本阐明了高产煤层气井所需要的煤储层地质条件,总结提炼出煤层气高产地质控制模式,提出了各类低产井的增产改造方案。郑庄区块单井日产气量在正断层发育区多为1 000~2 000 m³/d,在局部构造高点区为2 000~3 000 m³/d,在构造简单区多为1 000~3 000 m³/d,在局部构造低点区一般低于1 000 m³/d;产气量随煤层含气量的降低而减小,随临界解吸压力的增高而增大;煤层原始渗透率对产气量影响较小,这可能与原始渗透率普遍较低且压裂改造措施增产效果普遍较好有关。樊庄区块煤层气井产量主要受控于2类地质模式:
①构造控制模式出现在区内北部和中部区域,在陷落柱和断层附近产气量少而产水量高,在次级褶曲斜坡带煤层气井高产气而低产水;
②水文控制模式出现在区块南部,地层倾角较大的陡坡带强径流区煤层气井产水量高而产气量较低,缓坡、平坦地带弱径流区和深部滞留区煤层气井日产气量一般较高。

2.2 煤储层物性动态规律与数学模型

基于不同温压条件的物理模拟试验,结合地层

流体效应及其地质控制因素的探讨分析,通过煤储层单因素动态数值模拟,更为清晰地认识了排采过程中煤储层的物性动态规律,进而建立了可用于煤层气开发动态软件编制的数学模型组^[13~15]。

采用黔西织纳煤田无烟煤样,通过温压条件下煤层气渗流物理模拟,建立了煤储层渗流动态数学模型^[16~21]。在温度恒定,改变有效应力条件下,有效应力与煤层渗透率之间呈负指数关系。在固定轴压、改变围压条件下,围压越低则渗透率越高,两者呈多项式函数关系。在恒定平均有效应力和温度、改变气体条件下,建立了煤化作用程度、孔隙裂隙特征与煤层渗透率之间的非线性函数关系。

分析沁水盆地南部和鄂尔多斯盆地东缘煤层气井排采流体效应对煤层气井产出特征的控制作用,发现了“含水域”、“流体压力孤岛”、“煤层气水渗流分离”等现象,提出了高产水地区煤层气开发对策与建议^[14]。研究发现:多数煤层属于弱含水层,煤层气井高产水主要是产层与含水层导通所致,即产层及与其导通的含水层属于同一“含水域”,认为影响高产水与弱含水煤储层合采效果的主因是层间干扰,由此将产层与含水层关系划分为2类6种地质模式,不同模式需要采取不同的煤层气开发工艺措施^[22~23];区域压降过程会导致煤储层压力非均质性增强,甚至出现流体压力“孤岛”现象,需要针对特定井区强化排采或煤储层二次改造;规模开发条件下煤层气渗流过程中具有气水分异现象,导致形成“气顶气”,认为这是构造高部位的单井产气量相对较高的重要地质原因。

结合沁水盆地南部示范区的地质条件、排采生产数据和煤岩试验模拟,探讨了排采过程中煤储层

流固耦合特征和流体动态变化规律,建立了煤岩力学性质、流体压力、有效应力等动态变化的系列数学模型,通过典型煤层气井验证发现有关模型符合生产实际,为建立煤层气开发动态评价方法和研发相应软件提供了基础^[15,24-25]。

2.3 多层叠置含煤层气系统

在我国多煤层发育地区,煤层气多层合排通常效果不甚理想^[26-28]。研究发现,黔西盆地群和沁水盆地南部含煤地层在垂向上均发育多套独立叠置含煤层气系统,认为排采设计中未考虑这一因素是造成合层排采效果不甚理想的重要地质原因^[13,29]。为此,需要研究多煤层条件下含煤层气系统的发育特征,查明垂向上不同含气系统的流体压力异同,根据不同含气系统流体压力分布规律制定合理的递进排采方案,才有可能获得理想的煤层气排采效果^[13]。

在黔西盆地群织纳区块,上二叠统含煤地层发育4~5个三级层序,每个三级层序由海侵体系域和高位体系域组成,煤层主要发育在三级层序中最大海泛面附近,煤层孔隙性、渗透性、吸附性、扩散性等在沉积序列上的变化规律与含煤地层的旋回性具有高度一致性^[30-37,7]。发现发育于最大海泛面附近的煤层有利于镜质组分的富集,也易于煤化过程中生成更多的裂隙,成为煤层气的优良储层;高位体系域中煤层镜质组含量相对较低,导致其储气性较差,煤层含气量在层序边界附近发生突变^[38-39]。耦合分析层序地层结构与煤层含气性、孔渗性和吸附性,区分出多层叠置和多层统一2类含煤层气系统,提出了层序地层结构的控气模式,分析了2类含煤层气系统在三维空间上的配置关系;认为三级层序海侵体系域为一个相对封闭层,高位体系域是一个相对开放层,导致垂向上发育与三级层序相对应的独立含气系统,封闭层的封闭性是多层叠置独立含气系统发育的基础,决定了含气系统的类型^[40-41]。

依据测试数据和地层实际条件,基于等温吸附方程,按统一含气系统和多层叠置含气系统2种情况,分析了层序地层结构与煤层含气量之间的关系^[36-41]。统一含气系统垂向上不同煤层具有相同的水头高度,煤层含气量-埋深关系总体上应呈单调递增趋势,且煤储层压力系数随埋深增大而增高,无限接近1;多层叠置含气系统中,不同煤层含气量-埋深关系规律性波动,两者之间不存在单调变

化函数关系,各含气系统之间水头高度的显著差异是导致这种波动式变化的地质原因^[41]。实测数据显示,同一钻孔中煤层有关参数垂向变化与多层叠置含气系统规律一致^[41-44],指示层序地层结构宏观封闭性决定了煤层流体压力系统特征,进而影响到煤层含气性。

沁水盆地南部示范区山西组~太原组煤层含气量随层位降低呈非单调函数变化,在太原组9号煤层附近发生转折,指示该煤层上覆、下伏含煤层段分别属于不同的含气系统;太原组15号煤储层试井压差梯度明显高于山西组3号煤层,储层压力-埋深关系表现出非连续的特征,表明山西组与太原组含水层垂向水力联系微弱,构成多套相对独立的流体压力系统^[13]。上述特征揭示,沁水盆地南部相当一部分地区主煤层分别处于相对独立的含煤层气系统,独立含煤层气系统的形成是沉积、构造、水文地质条件耦合作用的结果,深刻影响到该区煤层气井生产特征,需要采取针对性的开发策略。

2.4 煤层气开发解吸阶段数值描述

煤层气解吸阶段的定量描述,是客观认识煤层气井产能,诊断煤层气井生产状况及优化排采管理的重要基础。基于沁水盆地南部钻孔煤心等温吸附试验结果,建立了以等效解吸率及其曲线特征来描述煤层气解吸阶段性的原理及方法,提出并确定了启动压力、过渡压力和敏感压力3个定义降压解吸阶段的关键压力点。在此基础上,将等温吸附试验下的煤层气解吸过程划分为零解吸、缓慢解吸、过渡解吸和敏感解吸4个阶段^[45]。

分析发现,等温吸附试验下的煤层气解吸阶段与煤层气井生产过程类似。零解吸阶段基本不产气;缓慢解吸阶段有少量气体解吸,但随着储层压力的降低,等效解吸率变化幅度减小,产气量增幅不大;基于等温吸附试验的煤层气解吸不存在低谷阶段,原因在于试验样品尺寸过小,不存在解吸气源补给的迟滞期;在过渡解吸阶段,等效解吸率明显增大,解吸气量显著增加。在敏感解吸阶段,单位压降煤层气解吸量达到最大,而实际排采过程中产量却是递减的,显然相互矛盾。原因可能在于4个方面:
①该阶段所对应的压降区间较过渡解吸阶段明显减小;
②煤层气井排采后期,排水作用基本停止,储层压力降低较前期变得困难;
③随着煤层气的解吸与采出,无烟煤煤储层渗透率显著持续减小,阻碍了煤

层气产出;④煤层气排采存在枯竭压力,即储层压力降低到一定阶段煤层气井产量自然会显著下降。

3 关于煤储层开发动态地质评价4项技术

基于上述4项理论认识,针对煤层气规模性开发中需解决的地质问题,围绕提高单井产气量这一根本目标,形成了4项创新技术^[1]。

3.1 煤层水及孔隙低场核磁共振表征技术

应用低场核磁共振物性分析技术,分析不同配比液体煤岩的核磁共振响应,建立了低场核磁共振煤岩孔隙度的标定及测试技术^[46]。在此基础上,基于不同煤阶和不同粒度样品在不同含水状态下的低场核磁共振系列试验,分析T₂谱弛豫时间与煤岩孔隙表面作用力特征,实现了煤岩表面吸附水、毛管束缚水、游离水的标定与识别,建立吸附孔、渗流孔、裂隙及其孔隙度的动态定量技术^[7,47~49]。研究认为,煤中水主要以吸附状态存在,后期可以通过核磁共振T₂谱的变化来跟踪排采过程中煤层水的迁移和状态转换,分析其对煤层气产出的影响。

3.2 煤层气有利建产区地质综合评价技术

分析沁水盆地南部和鄂尔多斯盆地东缘示范区煤层气富集、高渗和高产主控地质因素,建立了高阶、中~高、中阶煤储层定量综合评价体系,形成了区块内部煤层气有利建产区地质综合评价技术^[3]。研究发现,不同区块煤层气地质条件差异显著,必须采用有针对性的地质评价方法。

分析郑庄区块上百口煤层气井的生产资料,建立了高阶煤储层有利建产区地质综合评价技术^[3,50~56]。从有利开发单元入手,以单井产量为一级主评参数,以与单井产量相关性较大的煤层含气量、渗透率、地解压差为一级辅参数,采用灰色关联法赋予权重;对于地质构造、水文条件、地应力等二级辅参数则依据地质因素分析结果进行权重赋值。在此基础上,确定了评价要素及其权重的具体方法,进而建立了综合评价函数。据此,将郑庄区块年产8亿m³的产能建设区划分为4个类别:①Ⅰ类为高产区,综合评价值0.6~0.8,单井产气量大于2 000 m³/d;②Ⅱ类为中产区,综合评价值0.41~0.60,单井产气量1 000~2 000 m³/d;③Ⅲ类为低产区,综合评价值0.32~0.41,单井产气量500~1 000 m³/d;④Ⅳ类为极低产区,综合评价值小于0.32,单井产气量小于500 m³/d。

分析韩城区块数百口煤层气井的生产资料,建立了中~高阶煤储层有利建产区地质综合评价方法^[3,57]。基于敏感性地质因素分析,将水头高度、地层水矿化度2个二级参数合并,以煤层含气量为主参数列,以上覆泥岩厚度、构造变形强度、水文地质条件为辅参数列,建立了煤层气富集区层次评价结构。将煤层矿物质含量、煤岩胶结指数2个二级参数合并,以煤层渗透率为主参数列,以构造煤比例、水平应力差、变质程度为辅参数列,建立了煤层高渗区层次评价结构。采用多层次模糊综合评判方法,综合富集区与高渗区评价结果形成综合评价价值。据此,将韩城区块年产5亿m³产能建设区划分为5个类别:Ⅰ类为最佳建产区,综合评价值大于0.72;Ⅱ类为较有利建产区,综合评价值0.60~0.72;Ⅲ类为一般建产区,综合评价值0.48~0.60;Ⅳ类和Ⅴ类为暂缓建产区,综合评价值小于0.48,分布在区块深部地带与合阳地区。

分析柳林区块20余口煤层气井生产资料,建立了中阶煤储层有利建产区地质综合评价方法^[3]。在生产操作和排采时间类似的前提下,统计对比各单井的最大日产气量、平均日产气量和平均日产水量,利用产气量与产水量的比值以及平均日产气量与最大产气量比值,综合评价单井的排采效果和稳定性。分析认为,控制该区块煤层气井产气量的主要地质参数是渗透率、煤层厚度、含气量、储层压力及临储比^[58~60]。基于上述认识,提出了产气能力指数的概念,建立了煤层气产能预测模型,进行了主煤层产能的平面区划,认为产气能力和产气潜在该区产能主控地质因素分析上优于单纯利用煤厚、含气量、渗透率单参数对产能因素的分析效果。同时,该区块某些地段垂向上可能发育多套叠置含气系统,同一井区不同煤层组合具有不同的建产前景^[1]。

3.3 多层叠置含气系统煤层气递进排采地质设计技术

针对多煤层条件煤层气开发面临的困难,在查明垂向上不同含气系统煤储层地质特征的基础上,本着含气系统煤储层流体压力优化控制的设计理念,初步研发出根据不同含气系统流体压力递减规律进行排采地质设计的方法,为多层叠置含气系统煤层气生产工艺优化提供了基础^[13]。

通过探索,形成了“五步法”优化设计流程^[13]:

①开展单井排采历史拟合,反演出经过改造以后的煤储层关键参数,分析不同含气系统(煤层组)的产气贡献,并结合原位试井资料形成下一步产能模拟的输入参数集;②优化分析含气系统间垂向干扰与产气压力,查明不同系统的地层流体能量分布特征,摸清各系统储层压力、临界解吸压力、产气压力之间的相互关系;③分析单含气系统产能,了解在没有层间干扰情况下各系统的储层压力动态变化历史、产气历史和产气能力;④分析含气系统不同组合方案条件下的排采状况,了解不同层间干扰情况下煤层气井的产能特征和动态变化;⑤设计递进排采地质优化方案,本着系统间干扰最小化、地层能量利用程度最大化、单井产气量和采收率最大化的原则,提出多层含气系统煤层气递进优化排采制度设计。

以川南古叙区块为例,初步进行了近距离多煤层条件下的煤层气开发地质优化设计。以黔西织纳区块为例,进行了远距离多煤层煤层气递进开发地质优化设计^[13]。根据研究结果,建议对织纳区块实例井区的3套含气系统实施3个阶段的递进排采,依次递进单排中部、合排中部和下部、合排3个含气系统,进而可能达到单井产气量和采收率最大化的目的。在递进开发的第2阶段,单井累计产气量上升最快,平均日产气量整体最高。在整个排采过程中,中部含气系统日产气量最高,对产能的贡献最大。究其原因:中部含气系统主煤层累计厚度大,含气量较高,煤层气资源供给大;煤储层压力与临界解吸压力较接近,且朗格缪尔压力高,有利于煤层气的解吸和降压开采;煤储层原始渗透率较好,优于其他含气系统。

3.4 煤储层开发动态评价技术与软件系统

基于排采过程中煤储层力学性质、流体压力、气水数量动态模型的研究成果,围绕3个关键煤储层参数(含气量与相态、渗透性、储层压力)、2个关键井筒流量(产气量、产水量)和1个关键开发技术诊断(开发技术效果及其优化)的动态分析,改进和完善了煤层气动力学方程解算方法,集成数据接口、动力学方程解算、多参数动态显示三大功能模块研制完成煤储层开发动态评价软件,形成了由4个步骤构成的煤储层开发动态评价流程与方法^[15,61-70]。其中,针对国内外煤储层模拟商业软件存在的模型过于理想化或简单化、不能处理排采动态变化以及复杂地质条件等问题,结合吸附-解吸模型、孔隙/裂隙气水两相流动力学(三孔两渗非平衡拟稳态)等模型,完善了动力学模型的数学表达,形成了适合复杂排采条件的计算模型和算法。

在上述工作基础上,初步建立了煤储层开发动态地质评价的流程与方法^[15,71-75]。评价流程包括4个步骤:①基础资料处理和地质建模,重点解决数据资料空间性非均质性、动态性、不准确性、人为性等问题;②参数校正和优化,采用集对联系度、绝对关联度、相对关联度、综合关联度等量化方法,进行参数敏感性分析和历史拟合,有效降低相关基础数据所存在的误差;③储层系统动态观测,重点监测井区(网)范围内煤储层含气量、含气饱和度、储层压力(水压、气压)、有效解吸范围、渗透率等的动态变化;④开发技术优化和开发效果预测,为开发方式确定、钻井完井工艺技术优化、井位与井网优化、排采工作制度优化、气田开发总体方案优化等提供辅助决策依据。

动态评价软件系统经沁水盆地南部示范区煤层气井(网)生产资料的初步验证,可实现煤层含气量与相态、渗透性、储层压力3个关键储层参数的动态分析,可满足产气量、产水量2个井筒关键流量的预测,具有开发效果诊断的功能,为煤层气开发技术优化提供了辅助决策手段。

4 煤储层开发装备研制

自主研发成功多煤层条件下的多场耦合煤层气开采物理模拟试验系统,为探讨统一含气系统及多层叠置含气系统煤层气排采过程中煤储层物性动态规律提供了模拟试验条件;完成了煤层气直井流体参数探测仪样机的研制,完善了煤层含气量天然源超低频电磁探测仪的硬件改造和软件升级工作,并开展了现场试验^[1]。

4.1 多煤层多场耦合煤层气开采物理模拟装置

该模拟系统具有如下主要功能:考虑多物理场相互耦合时储层中煤层气流动状态的变化规律,模拟多物理场(应力场、裂隙场、渗流场)耦合时单一煤层和多煤层状态下的煤层气排采情况,分析煤层气流动与煤岩体裂隙耦合的时空演化规律及应力场、裂隙场、渗流场、温度场的影响,为现场作业提供理论指导^[76-80]。

整体结构主要由主体承载支架、试件箱体、快速推拉密封门、伺服加载系统、抽采管、数据采集系统

和其他附属设备组成。其中,煤层气抽采管线设计了单一煤储层和多煤层联合排采2种情况。主要技术参数:大试样 $410\text{ mm}\times 410\text{ mm}\times 1050\text{ mm}$,力、位移全闭环及自编程控制模式,测力精度 $\pm 0.5\%$,位移测量精度 0.1 mm ,最大压力 5000 kN ,液压站流量 10 L/min ,三轴最大加载压力均为 10 MPa ,试件容器密封气压不小于 6.0 MPa 。

4.2 煤层气直井流体参数探测仪样机

探测仪功能为:实时探测垂直井油套环气液混合流体压力、温度、流量、含气率、液位5个原始参数,进而解释煤层气井眼纵向气液两相流的主要参数,描述气液两相流的基本特征,解决目前单纯压力计不能准确确定两相流高度的技术难题^[81-82]。

整体结构的核心部件是探测传感器,包括压力传感器、温度传感器、靶式流量计、加速度计和液位传感器。其中:压力传感器(HM23Y压力变送器)探测范围 $-0.1\sim 220\text{ MPa}$,温度传感器(DS18B20温度传感器)探测范围 $-55\sim +125\text{ }^{\circ}\text{C}$,靶式流量计(Y系列应变片),加速度传感器(MS9000惯性加速度传感器)探测精度 $\pm 2g$, g 为重力加速度。

针对煤层气钻采井中流体的实时监测环境,在室内分别对各种传感器进行了性能测试和精度标定试验。同时,完成了整体调试试验以及参数控制系统的调试试验。

4.3 煤层含气量天然源超低频电磁探测仪

在原有基础^[83]上,进一步优化了传感器信号放大电路,增加了针对消除电干扰的滤波器;重新设计和优化了传感器线圈的直径和匝数,提高了灵敏度;在传感器和蓄电池上均增加了电表,可以随时监测到仪器用电的盈亏情况;对数据采集和处理软件系统进行了升级。通过改进,完善了探测仪的信号接收、噪声抑制以及数据处理等方面的功能和精度^[81,83-86]。

该探测仪在沁水盆地南部进行了连续5年(2008—2012)的现场试验、数据采集和数据处理,对比分析了超低频信号解释煤层含气量与实测数据,定性研究了探测信号与煤层含气性之间的约束关系,探索了煤层气生产井含气性空间分布及其动态变化规律。现场试验结果显示:在目标煤层深度($500\sim 600\text{ m}$)范围内,煤层含气量响应强烈,年间隔探测曲线振幅变化明显,指示排采过程导致煤层含气量发生了显著改变。同时,建立了煤层含气量多

元函数评估模型,初步实现了煤层含气量动态变化的超低频电磁定量探测。

5 结语

我国煤层气地面规模开发历史不长,经验和资料积累有限,开发地质条件分析与动态评价关键理论和技术亟待发展。项目组依托国家科技重大专项,就区块尺度煤储层特性精细描述、煤层含气量与渗透性动态探测、高产水/弱含水煤储层特性排采动态预测、多煤层条件下煤层气联合开采储层动态评价、煤储层开发动态地质评价系统及软件等5个关键技术难点开展研究,取得了4项理论认识,介绍了4项技术进展,研发了3套试验与探测装置,初步建立了煤层气开发地质保障技术体系的框架。然而,目前的认识和进展有待于在生产实践中进一步检验完善,低阶煤储层、深部煤储层、构造煤储层等的开发动态评价与诊断技术尚未实质性涉及,要满足煤层气规模化生产的需求尚有大量工作需要开展。

致谢:衷心感谢本项目组大量科研骨干和研究生为成果取得做出的创造性贡献,感谢中国石油煤层气有限责任公司、中联煤层气有限责任公司、山西蓝焰煤层气集团有限责任公司等国有大型煤层气企业对本文相关研究工作的全力支持!

参考文献:

- [1] 秦勇,汤达祯.煤层气储层工程及动态评价技术[R].徐州:中国矿业大学,2013.
- [2] 秦勇,袁亮,胡千庭,等.我国煤层气勘探与开发技术现状及发展方向[J].煤炭科学技术,2012,40(10):1-6.
- [3] 刘大锰,姜波.煤储层特性区块尺度精细描述技术[R].北京:中国地质大学(北京),2013.
- [4] 张松航,汤达祯,唐书恒,等.鄂尔多斯盆地东缘煤层气储集与产出条件[J].煤炭学报,2009,34(10):1297-1304.
- [5] 李俊乾,刘大锰,姚艳斌,等.郑庄区块煤层气富集主控地质因素及开发前景分析[C]//中国煤炭学会煤层气专业委员会等:2011年煤层气学术研讨会论文集.北京:地质出版社,2011:187-195.
- [6] LI Jun-qian, LIU Da-meng, YAO Yan-bin, et al. Evaluation of the Reservoir Permeability of Anthracite Coals by Geophysical Logging Data[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 87: 121-127.
- [7] LI Song, TANG Da-zhen, XU Hao, et al. Porosity and Permeability Models for Coals Using Low-field Nuclear Magnetic[J]. Resonance Energy & Fuel, 2011, 26(8): 5005-5014.
- [8] 曹新权,朱炎铭,王道华,等.郑庄区块煤层气赋存特征及控气

- 地质因素[J].煤田地质与勘探,2011,39(1):16-19,23.
- [9] TAO Shu, WANG Yan-bin, TANG Da-zhen, et al. Dynamic Variation Effects of Coal Permeability During the Coalbed Methane Development Process in the Qinshui Basin, China [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 93: 16-22.
- [10] 王向浩,王延斌,袁 钧.枣庄区块资源条件与煤层气垂直井产能关系研究[J].煤炭科学技术,2012,40(12):104-107.
- [11] 姜 波,许进鹏,朱 奎,等.鄂尔多斯盆地东缘构造-水文地质控气特征[J].高校地质学报,2012,18(3):438-446.
- [12] 王琳琳,姜 波,屈争辉.鄂尔多斯盆地东缘煤层含气量的构造控制作用[J].煤田地质与勘探,2013,41(1):14-19,24.
- [13] 秦 勇,傅雪海,许 江.多煤层条件下煤层气联合开采储层动态评价技术[R].徐州:中国矿业大学,2013.
- [14] 张遂安,唐书恒.高产水/弱含水煤储层特性排采动态预测技术[R].北京:中国石油大学(北京),2013.
- [15] 韦重韬,王延斌,杨永国.煤储层开发动态评价模型与软件系统[R].徐州:中国矿业大学,2013.
- [16] 许 江,袁 梅,李波波,等.煤的变质程度、孔隙特征与渗透率关系的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(4):681-687.
- [17] 许 江,周 婷,李波波,等.三轴应力条件下煤层气储层渗流滞后效应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(9):1854-1861.
- [18] PENG Shou-jian, XU Jiang, LIU Dong. Experimental Study on the Influence Factors of Coal Contain-In-Gas During the Fracture Process [J]. Disaster Advances, 2012, 5(4): 1385-1389.
- [19] YIN Guang-zhi, JIANG Chang-bao, XU Jiang, et al. An Experimental Study on the Effects of Water Content on Coalbed Gas Permeability in Ground Stress Fields [J]. Transport in Porous Media, 2012, 94(1): 87-99.
- [20] 尹光志,黄启翔,张东明,等.地应力场中含瓦斯煤岩变形破坏过程中瓦斯渗透特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(2):336-343.
- [21] 尹光志,李文璞,李铭辉,等.不同加卸载条件下含瓦斯煤力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(5):891-901.
- [22] 唐书恒,李忠诚.一种顶板高含水煤储层的煤层气开发布井方法:中国,201210387874.8[P].2013-02-13.
- [23] 王善博,唐书恒,万 耕,等.山西沁水盆地南部太原组煤储层产出水氢氧同位素特征 [J].煤炭学报, 2013, 38 (3): 448-454.
- [24] 杜严飞,吴财芳,邹明俊,等.煤层气排采过程中煤储层压力传播规律研究[J].煤炭工程,2011(7):87-89.
- [25] 冯 晴,吴财芳,雷 波.沁水盆地煤岩力学特征及其压裂裂缝的控制[J].煤炭科学技术,2011,39(3):100-103.
- [26] 秦 勇,熊孟辉,易同生,等.论多层叠置独立含煤层气系统:以贵州织金-纳雍煤田水公河向斜为例[J].地质论评,2008,54(1):65-70.
- [27] 李 伍,朱炎铭,陈尚斌,等.滇东老厂矿区多层叠置独立含煤层气系统[J].中国煤炭地质,2010,22(7):18-21.
- [28] 郭 晨,秦 勇,卢玲玲.中国含煤层气系统研究综述与展望 [C]//2013年煤层气学术研讨会论文集.北京:地质出版社,2013:1-8.
- [29] 高 弟,秦 勇,吴财芳,等.织纳煤田上二叠统煤层气能量系统及其控藏效应[J].中国煤炭地质,2012,24(9):1-6.
- [30] 常会珍,秦 勇,王 飞.贵州珠藏向斜煤样孔隙结构的差异性及其对渗流能力的影响[J].高校地质学报,2012,18(3):544-548.
- [31] 王盼盼,秦 勇,高 弟.观音山勘探区煤层含气量灰色关联预测[J].煤田地质与勘探,2012,40(4):34-38.
- [32] 周龙刚,吴财芳.黔西北德-三塘盆地主采煤层孔隙特征[J].煤炭学报,2012,37(11):1878-1884.
- [33] GAO Di, QIN Yong, YI Tong-sheng. CBM Geology and Exploring-Developing Stratagem in Guizhou Province, China [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, 1(1): 882-887.
- [34] LEI Bo, QIN Yong, GAO Di. Vertical Diversity of Coalbed Methane Content and its Geological Controls in the Qingshan Syncline, Western Guizhou Province, China [J]. Energy Exploration & Exploitation, 2012, 30(1): 43-58.
- [35] 李 松,汤达祯,许 浩,等.贵州省织金-纳雍地区煤储层物性特征研究[J].中国矿业大学学报,2012,41(6):951-958.
- [36] 杨兆彪,秦 勇,高 弟,等.煤层群条件下的煤层气成藏特征 [J].煤田地质与勘探,2011,39(5):22-26.
- [37] 杨兆彪,秦 勇,高 弟.黔西北德-三塘盆地煤层群发育特征及其控气特殊性[J].煤炭学报,2011,36(4):593-597.
- [38] 沈玉林,秦 勇,郭英海,等.多层叠置独立含煤层气系统形成的沉积控制因素[J].地球科学:中国地质大学学报,2012,37(3):573-579.
- [39] 沈玉林,秦 勇,郭英海,等.黔西北德-三塘盆地煤层气系统特征及其沉积控制[J].高校地质学报,2012,18(3):427-432.
- [40] 杨兆彪,秦 勇,陈世悦,等.多煤层储层能量垂向分布特征及控制机理[J].地质学报,2013,87(1):139-144.
- [41] 杨兆彪,秦 勇,高 弟.黔西北德-三塘盆地煤层群含气系统类型及其形成机理[J].中国矿业大学学报,2011,40(2):215-220,226.
- [42] 杨兆彪,秦 勇,兰凤娟.钻孔剖面多煤层物性X-CT响应及其地质意义[J].高校地质学报,2012,18(3):511-515.
- [43] 李 腾,吴财芳.黔西织纳煤田华乐勘探区煤层气吸附性研究 [J].煤炭科学技术,2013,41(4):100-103.
- [44] 梁冲冲,吴财芳,李 腾.多煤层叠置独立含气系统中煤储层孔隙特征研究[J].煤炭科学技术,2013,41(6):104-107,5.
- [45] ZHANG Zheng, QIN Yong, Geoff X Wang, et al. Numerical Description of Coalbed Methane Desorption Stages Based on Isothermal Adsorption Experiment [J]. Science China (Earth Sciences), 2013, 56(6): 1029-1036.
- [46] 姚艳斌,刘俊刚,刘大锰,等.一种测量煤中不同状态水分含量的方法:中国,20121039 5274.6[P].2013-02-27.
- [47] 姚艳斌,刘大锰,蔡益栋,等.基于NMR和X-CT的煤的孔隙精细定量表征[J].中国科学:地球科学,2010,40(11):1598-1607.
- [48] 姚艳斌,杨培强,刘俊刚,等.一种对多孔介质进行水蒸汽饱和的核磁共振仪器探头配套装置:中国,201210452296.1[P].

2013-03-06.

- [49] YAO Yan-bin, LIU Da-meng. Comparison of Low-field NMR and Mercury Intrusion Porosimetry in Characterizing Pore Size Distributions of Coals [J]. Fuel, 2012, 95: 152-158.
- [50] 许 浩, 汤达祯, 唐书恒, 等. 几种关键压力的控制因素及其对煤层气井产能的影响 [C] // 2010 年全国煤层气学术研讨会论文集. 北京: 石油工业出版社, 2010: 53-58.
- [51] 许 浩, 汤达祯, 唐书恒, 等. 沁南地区重点区块煤储层渗透率控制因素及产能响应 [C] // 2011 年煤层气学术研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 2011: 141-146.
- [52] 吕玉民, 汤达祯, 许 浩, 等. 煤层气藏开发初期单相水排采特征及其指示意义—以沁水盆地南部煤层气田为例 [C] // 2011 年煤层气学术研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 2011: 376-382.
- [53] 陶 树, 王延斌, 汤达祯, 等. 沁水盆地南部煤层孔隙—裂隙系统及其对渗透率的贡献 [J]. 高校地质学报, 2012, 18(3): 522-527.
- [54] 陶 树, 汤达祯, 许 浩, 等. 沁南煤层气井产能影响因素分析及开发利用建议 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 194-198.
- [55] 陶 树, 汤达祯, 许 浩, 等. 沁水盆地樊庄区块煤层气直井高产参数分析 [C] // 2013 年煤层气学术研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 2013: 188-195.
- [56] 林 然, 倪小明, 王延斌. 沁水盆地樊庄区块煤层气高产区预测 [J]. 高校地质学报, 2012, 18(3): 558-562.
- [57] 刘俊刚, 刘大锰, 姚艳斌, 等. 韩城示范区煤层气解吸规律及其地质影响因素 [J]. 高校地质学报, 2012, 18(3): 490-494.
- [58] 许 浩, 汤达祯, 郭本广, 等. 柳林地区煤层气井排采过程中产水特征及影响因素 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1581-1585.
- [59] 高丽军, 汤达祯, 许 浩, 等. 柳林地区太原组灰岩含水层富水性研究 [C] // 2013 年煤层气学术研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 2013: 84-93.
- [60] 喻廷旭, 汤达祯, 许 浩, 等. 柳林矿区不同煤岩类型煤的孔隙特征 [J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(S1): 362-366.
- [61] 蔡志翔, 韦重韬, 邹明俊, 等. 潘河地区煤层气井排采制度优化 [J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(10): 18-21.
- [62] 杜严飞, 吴财芳, 杨庆龙, 等. 基于人工神经网络的煤层气井产能预测研究 [J]. 中国煤炭, 2012, 38(12): 9-13, 17.
- [63] 郭 晨, 秦 勇, 韦重韬. 潘庄区块煤层气井网优化设计与产能预测 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(8): 104-106.
- [64] 罗金辉, 杨永国, 秦 勇, 等. 基于组合权重的煤层气有利区块模糊优选 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(2): 242-246.
- [65] 倪小明, 王延斌, 沈 穆, 等. 煤层气井排采过程气压传播模拟方法、装置与模拟实验系统: 中国, 201210119877.3[P]. 2012-08-15.
- [66] 汪吉林, 秦 勇, 傅雪海. 多因素叠加作用下煤储层渗透率的动态变化规律 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1348-1353.
- [67] 朱 静, 杨永国, 李凤玲. 黔西-滇东煤层气地质信息数据库系统 [J]. 地理空间信息, 2010, 8(3): 67-69.
- [68] SHEN Jian, QIN Yong, Geoff X Wang, et al. Relative Permeabilities of Gas And Water for Different Rank Coals [J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86(2-3): 266-275.
- [69] LIU Ai-hua, FU Xue-hai, LUO Bin, et al. Comprehensive Analysis of CBM Recovery in High Rank Coal Reservoir of Jincheng Area [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23: 447-452.
- [70] BAO Yuan, WEI Chong-tao, PENG De-hua, et al. Quantitative Identification of Coal-Type Gas and Oil-type Gas in Source-Mixed Gas at the Northern Margin of Qaidam Basin [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23: 435-439.
- [71] 韦重韬, 秦 勇, 鲍 园, 等. 煤层气产储层模拟器软件 (CUMTCBMRM V1.0) (国家软件著作权 2009R11L086051) [CP]. 国家知识产权保护中心, 2009.
- [72] 韦重韬, 秦 勇, 傅雪海, 等. 煤储层开发动态评价数据库系统 (CBMDBMS) V1.0 (国家软件著作权 2013SR004797) [DB]. 国家知识产权保护中心, 2013.
- [73] 周荣福, 傅雪海, 秦 勇, 等. 高煤阶煤煤层气田生产动态评价软件 (V1.0) (国家软件著作权 2011SR016349) [CP]. 国家知识产权保护中心, 2011.
- [74] 杨永国, 奚帆涛, 周荣福, 等. 煤层气项目经济评价辅助决策系统 (CBMDS) V1.0 (国家软件著作权 2013SR004798) [CP]. 国家知识产权保护中心, 2013.
- [75] ZOU Ming-jun, WEI Chong-tao, LI Lai-cheng, et al. Numerical Simulation on Reservoir Pressure Dynamic Changes of Typical Coalbed Methane Single Well and Well Net Group: A Case Study on QN01 Well in the Southern Qinshui Basin, China [J]. Energy Exploration and Exploitation, 2013, 31(2): 249-265.
- [76] 许 江, 尹光志, 刘 东, 等. 多场耦合煤层气开采物理模拟试验系统: 中国, 2013100250 93.9[P]. 2013-05-22.
- [77] 许 江, 尹光志, 王维忠, 等. 多场耦合煤层气抽采模拟试验方法: 中国, 2013100250 98.1[P]. 2013-05-22.
- [78] 尹光志, 许 江, 刘 东, 等. 多煤层联合开采过程中煤层气抽采试验方法: 中国, 2013100 25114.7[P]. 2013-05-08.
- [79] 尹光志, 许 江, 王维忠, 等. 多场耦合煤层气开采物理模拟试验管: 中国, 2013100250 95.8[P]. 2013-05-08.
- [80] 刘 东, 许 江, 尹光志, 等. 多场耦合煤矿动力灾害大型模拟试验系统研制与应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 966-975.
- [81] 王生维, 秦其明. 基于静态信息/排采历史耦合的煤储层分析与探测技术 [R]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2013.
- [82] 王生维, 乌效鸣, 路桂英, 等. 煤层气排采井井底气流上举参数检测装置: 中国, 201210470839.2[P]. 2013-03-13.
- [83] 秦其明, 王清培, 崔容菠, 等. 一种处理超低频数据的方法: 中国, 200910088877.X[P]. 2011-01-26.
- [84] 李百寿, 秦其明, 蒋洪波, 等. 被动式超低频电磁探测数据采集与处理方法研究 [J]. 地学前缘, 2010, 17(3): 259-268.
- [85] 蒋洪波, 秦其明, 李百寿. 煤层气排采动态的被动式超低频频谱分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(7): 1898-1901.
- [86] 蒋洪波, 陈 超, 秦其明. 天然源超低频频谱的曲波分解与分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(2): 472-475.